



中国腐蚀与防护学会
著作出版基金

材料延寿与可持续发展

镁合金选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
张津 等编著



化学工业出版社



中国腐蚀与防护学会
著作出版基金

材料延寿与可持续发展

镁合金选用与设计

《材料延寿与可持续发展》丛书总编委会 组织编写
张津 等编著



化学工业出版社

· 北京 ·

本书从促进镁合金可持续发展的角度出发,全面地介绍了镁合金的基本性能和目前在各领域中的使用,包括镁合金在汽车、摩托车、自行车、手动电动工具、3C产品等领域的使用情况以及在这些领域应用时的选材原则,重点分析了镁合金在各种环境中的腐蚀性能、摩擦磨损性能以及腐蚀疲劳性能和相关的选材设计、结构设计和表面处理方法,探讨影响镁合金使用寿命的主要因素以及预防和控制措施,从而延长镁合金材料的使用寿命,提高材料制成品的可靠性、安全性和耐久性。同时还从目前提倡的“再制造、再循环、再利用”的角度出发,总结了镁合金的再制造方法和研究现状,可以给读者提供全方位的镁合金防护与失效分析指导。

本书适合从事镁合金加工、表面技术的科研、技术开发和零件制造的技术人员、管理人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

镁合金选用与设计/张津等编著. —北京:化学工业出版社, 2017. 12
(材料延寿与可持续发展)
ISBN 978-7-122-30840-5

I. ①镁… II. ①张… III. ①镁合金-设计 IV. ①TG146.2

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第258130号

责任编辑:刘丽宏 段志兵 王清颖
责任校对:边涛

文字编辑:孙凤英
装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:三河市延风印装有限公司

710mm×1000mm 1/16 印张18 $\frac{3}{4}$ 字数358千字 2017年12月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

《材料延寿与可持续发展》丛书顾问委员会

主任委员：师昌绪

副主任委员：严东生 王淀佐 干 勇 肖纪美

委 员（按姓氏拼音排序）：

安桂华	白忠泉	才鸿年	才 让	陈光章	陈蕴博
戴圣龙	俸培宗	干 勇	高万振	葛昌纯	侯保荣
柯 伟	李晓红	李正邦	刘翔声	师昌绪	屠海令
王淀佐	王国栋	王亚军	吴荫顺	肖纪美	徐滨士
严东生	颜鸣皋	钟志华	周 廉		

《材料延寿与可持续发展》丛书总编辑委员会

名誉主任（名誉总主编）：

干 勇

主 任（总主编）：

李金桂 张启富

副 主 任（副总主编）：

许淳淳 高克玮 顾宝珊 张 炼 朱文德 李晓刚

编 委（按姓氏拼音排序）：

白新德	蔡健平	陈建敏	程瑞珍	窦照英	杜存山
杜 楠	干 勇	高克玮	高万振	高玉魁	葛红花
顾宝珊	韩恩厚	韩雅芳	何玉怀	胡少伟	胡业锋
纪晓春	李金桂	李晓刚	李兴无	林 翠	刘世参
卢凤贤	路民旭	吕龙云	马鸣图	沈卫平	孙 辉
陶春虎	王 钧	王一建	武兵书	熊金平	许淳淳
许立坤	许维钧	杨卯生	杨文忠	袁训华	张 津
张 炼	张启富	张晓云	赵 晴	周国庆	周师岳
周伟斌	朱文德				

办 公 室：袁训华 张雪华

《材料延寿与可持续发展》丛书指导单位

中国工程院

中国科学技术协会

《材料延寿与可持续发展》丛书合作单位

中国腐蚀与防护学会

中国钢研科技集团有限公司

中国航发北京航空材料研究院

化学工业出版社

丨 总序言 丨

在远古人类处于采猎时代，依赖自然，听天由命；公元前一万年开始，人类经历了漫长的石器时代，五千多年前进入青铜器时代，三千多年前进入铁器时代，出现了农业文明，他们砍伐森林、种植稻麦、驯养猪狗，改造自然，进入农牧经济时代。18世纪，发明蒸汽机车、轮船、汽车、飞机，先进的人类追求奢侈的生活、贪婪地挖掘地球、疯狂地掠夺资源、严重地污染环境，美其名曰人类征服自然，而实际是破坏自然，从地区性的伤害发展到全球性的灾难，人类发现在无休止、不理智、不文明地追求享受的同时在给自己挖掘坟墓。

人类终于惊醒了，1987年世界环境及发展委员会发表的《布特兰报告书》确定人类应该保护环境、善待自然，提出了“可持续发展战略”，表达了人类应该清醒地、理智地、文明地处理好人与自然关系的大问题，指出“既满足当代人的需求，又不对后代人满足其需求的能力构成危害的发展”，称之为可持续发展。其核心思想是“人类应协调人口、资源、环境与发展之间的相互关系，在不损害他人和后代利益的前提下追求发展”。

这实际上是涉及到我们人类赖以生存的地球如何既满足人类不断发展的需求，又不被破坏、不被毁灭这样的大问题；涉及到人口的不断增长、生活水平的不断提高、资源的不断消耗、环境的不断恶化；涉及矿产资源的不断耗竭、不可再生能源资源的不断耗费、水力资源的污染、土地资源的破坏、空气质量的不断恶化等重大问题。

在“可持续发展”战略中，材料是关键，材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导、是可持续发展的支柱。如果不断发现新矿藏，不断研究出新材料，不断延长材料的使用寿命，不断实施材料的再制造、再循环、再利用，那么这根支柱是牢靠的、坚强的，是能够维护人类可持续发展的！

在我国，已经积累了许许多多预防和控制材料提前失效（其因素主要是腐蚀、摩擦磨损磨蚀、疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，需要汇总和提供应用，《材料延寿与可持续发展》丛书以多个专题力求解决这一课题项目。有一部分专题阐述了材料失效原理和过程，另一部分涉及工程领域，结合我国已积累的材料失

效的案例和经验，更深入系统地阐述预防和控制材料提前失效的理论、原则、技术和措施。丛书总编辑委员会前后花费五年的时间，将分散在全国各个研究院所、工厂、院校的研究成果经过精心分析研究、汇聚成一套系列丛书，这是一项研究成果、是一套高级科普丛书、是一套继续教育实用教材。希望对我国各个工业部门的设计、制造、使用、维护、维修和管理人员会有所启示、有所参考、有所贡献；希望对提高全民素质有所裨益、对国家各级公务员有所参考。

我国正处于高速发展阶段，制造业由大变强，材料的合理选择和使用，以达到装备的高精度、长寿命、低成本的目的，这一趋势应该受到广泛的关注。

中国科学院院士

中国工程院院士

师昌绪

丨 总前言 丨

材料是人类赖以生存和发展的物质基础，是人类社会进步的标志和里程碑，是社会不断进步的先导，是国家实现可持续发展的支柱。然而，地球上的矿藏是有限的，而且需要投入大量的能源，进行复杂的提炼、处理，产生大量污染，才能生产成为人类有用的材料，所以，材料是宝贵的，需要科学利用和认真保护。

半个多世纪特别是改革开放三十多年来，我国材料的研究、开发、应用有了快速的发展，水泥、钢铁、有色金属、稀土材料、织物等许多材料的产量多年居世界第一。我国已经成为世界上材料的生产、销售和消费大国。“中国材料”伴随着“中国制造”的产品，遍布全球；伴随着“中国建造”的工程项目，遍布全国乃至世界上很多国家。材料支撑我国国民经济连续 30 多年 GDP 年均 10% 左右的高速发展，使我国成为全球第二大经济体。但是，我国还不是材料强国，还存在诸多问题需要改进。例如，在制造环境、运行环境和自然环境的作用下，出现过早腐蚀、老化、磨损、断裂（疲劳），材料及其制品在使用可靠性、安全性、经济性和耐久性（简称“四性”）方面都还有大量的工作要做。

“材料延寿”是指对材料及其制品在服役环境作用下出现腐蚀、老化、磨损和断裂而导致的过早失效进行预防与控制，以尽可能地提高其“四性”，也就是提高水平，提高质量，延长寿命。目标是节约资源、能源，减少对环境的污染，支持国家可持续发展。

材料及制品的“四性”实质上是材料及制品水平高低和质量好坏的最终表征和判断标准。追求“四性”，就是追求全寿命周期使用的高水平、高质量，追求“质量第一”，追求“质量立国”，追求“材料强国”、“制造强国”、“民富、国强、美丽国家”。

我国在“材料延寿与可持续发展”方面，做过大量的研究，取得了显著的成绩，积累了丰富的实践经验，凝练出了一系列在材料全寿命周期中提高“四性”的重要理论、原则、技术和措施，可以总结，服务于社会。

“材料延寿与可持续发展”丛书的目的就在于：总结过去，总结已有的系统控制材料提前损伤、破坏和失效的因素，即腐蚀、老化、磨损和断裂（主要是疲劳与腐蚀疲劳）的理论、原则、技术和措施，使各行业产品设计师，制造、使用和管理工程师有所启示、有所参考、有所作为、有所贡献，以尽可能地提高产品的“四性”，

延长使用寿命。丛书的目的还在于：面对未来、研究未来，推进材料的优质化、高性能化、高强度、长寿命化，多品质、多规格化、标准化，传统材料的综合优化，材料的不断创新，并为国家长远发展，提出成套成熟可靠的理论、原则、政策和建议，推进国家“节约资源、节能减排”、“可持续发展”和“保卫地球、科学、和谐”发展战略的实施，加速创建我国“材料强国”、“制造强国”。

在中国科协和中国工程院的领导与支持下，一批材料科学工作者不懈努力，不断地编写和出版系列图书。衷心希望通过我们的努力，既能对设计师，制造、使用和管理工程师“材料延寿与可持续发展”的创新有所帮助，又能为国家成功实施“可持续发展”、“材料强国”、“制造强国”的发展战略有所贡献。

中国工程院院士

中国工程院副院长



| 前言 |

镁合金是可作为结构件使用的最轻金属材料，是世界上储量最丰富的元素之一，每立方米海水中含有 1kg 镁，因此可以说镁是永不耗竭的材料。由于其密度低（只有 $1.74\text{g}/\text{cm}^3$ ，是钢密度的 $1/4$ 、铝合金的 $2/3$ ），比强度大，刚性好，容易铸造成型，具有电磁屏蔽特性和减振特性，又有优异的生物相容性和可回收利用等特殊性能，近十余年来受到各级政府、企业人士以及相关科研人员的高度重视。随着世界范围内资源及能源的日益枯竭和环境污染日趋严重，对各种交通工具、武器装备等部件的舒适性、安全性和轻量化的要求不断提高，迫切要求大量使用轻质材料，促使镁合金研究、开发和应用推广成为热点领域。

近年来，世界镁工业和镁合金加工技术得到了飞速发展，特别是中国在此领域的研究有突飞猛进的势头，镁合金的轻质特性和阻尼特性在汽车、摩托车、自行车等交通领域零部件上的应用首先得到快速的发展；其比强度高、电磁屏蔽和密度低等特性在航空航天及兵器等军品制造中的应用也在逐渐扩大；其特殊的抗电磁辐射能力和质量轻的特点作为计算机、手机壳体等部件在 3C 产品（Computer, Communication and Consumer Electronic）上也得到一定的应用；镁合金的高阻尼减振性好的特点使其成为手动和电动工具的首选材料；镁是人体所需的元素之一，它与人体的良好相容性将成为未来十分有前景的生物医用材料。

本书从促进镁合金可持续发展的角度出发，全面地介绍了镁合金固有的基本性能，镁合金的成型加工特性（铸造、挤压、焊接）和热处理特性，镁合金的种类及在不同领域应用的选用原则；介绍了镁合金在交通领域（汽车、摩托车、自行车、列车）、3C 产品、航空航天、能源领域及其他工业领域的最新使用情况，特别展望了镁合金作为生物医用材料的发展前景；总结了镁合金在各种环境中的腐蚀性能、摩擦磨损性能以及疲劳与腐蚀疲劳性能，重点总结了提高上述性能的选材设计、结构设计和表面防护处理方法，探讨了影响镁合金使用寿命的主要因素以及预防和控制措施，从而延长镁合金材料的使用寿命，提高材料制成品的可靠性、安全性和耐久性；从目前提倡的“再制造、再循环、再利用”的角度出发，归纳了镁合金的再制造方法和研究现状，镁合金废料的产生、分类、回收利用方法，并提出回收利用存在的问题。

镁合金不同于钛合金和铝合金，虽然已有 80 多年的应用历史，但之前主要是在高端的航空航天和军工领域，由于其特殊性许多应用不为人所知。近年来镁合金在民品中的加工应用多是通过铝合金的加工手段改进的，镁合金的加工特性和极差的耐腐蚀特性使其在应用中的效果依旧处于关注的热点，

本书介绍了一些前沿性的探索研究，有些技术或方法暂时还停留在实验室研究阶段，仅供读者参考，建议读者在采用某一技术或方法时，一定要对该技术的优缺点全面了解，杜绝因镁合金使用不当造成的安全事故发生。希望本书能为镁合金材料构件的工程设计人员、制造工程人员、使用维护、维修和管理工程人员提供参考，从而达到提高他们所设计、制造产品的可靠性、安全性和耐久性，达到延长材料使用寿命的目的，为国家有效地节约资源、能源，支持可持续发展。

本书的有些章节是在本人和章宗和编著的《镁合金及应用》的基础上修改、补充和完善的，在此感谢曾参与编写这些章节的杨明波教授、曾荣昌教授、黄少东研究员、唐全波教授和章宗和研高级工程师；另外本书在交通领域应用章节由重庆盛镁镁业有限公司曹建勇组织编写；生物医用镁合金章节完全由郑州大学关绍康和朱世杰教授编写，在此对他们的贡献表示衷心的感谢。此外在本书撰写过程中参考引用了大量文献资料，本书没有在引用处一一对应，但在各章后面都总附其参考文献，在此对本书引用的所有参考资料的作者表示真诚的感谢，特别要感谢宋光铃教授、陈振华教授。同时也要感谢研究生朱晓辉、朱阮利同学帮助进行了该书的部分编辑整理。在本书的编写过程中我国表面工程和腐蚀控制专家、航空材料科学家李金桂教授提供了许多建议和支持，在此深表感谢。

限于时间和资料收集阅读等原因，本书存在一些不妥和疏漏之处，同时本人才疏学浅，在编著过程中也存在许多不足之处，若读者发现，请及时赐教与指正。

张津

目录

第1章 镁合金材料的基本性能

1.1 镁材料简介	1
1.2 纯镁的元素特性	2
1.2.1 镁元素	2
1.2.2 原子核特性	3
1.2.3 晶体结构	3
1.2.4 质量特性	6
1.3 镁及镁合金的物理和化学性能	6
1.3.1 热性能	6
1.3.2 热力学性能	10
1.3.3 电学和磁学性质	11
1.3.4 光学和声学性质	12
1.3.5 化学性能	12
1.4 镁及镁合金的力学性能和工艺性能	12
1.4.1 力学性能	12
1.4.2 工艺性能	14
参考文献	15

第2章 镁合金的分类及性能

2.1 镁合金牌号与分类	16
2.1.1 镁合金牌号	16
2.1.2 镁合金的分类	20
2.2 镁的合金强化与途径	22
2.2.1 镁的合金化	22
2.2.2 合金化强化	25
2.3 铸造镁合金组织和性能	27
2.3.1 Mg-Al 系合金组织	27
2.3.2 Mg-Zn 系合金	31
2.3.3 铸造镁合金的性能	32
2.4 变形镁合金的组织和性能	34

2.4.1	变形镁合金组织	35
2.4.2	变形镁合金性能	36
2.5	新型镁合金	38
2.5.1	快速凝固镁合金	38
2.5.2	镁基非晶合金	39
2.5.3	镁基复合材料	41
2.6	镁合金热处理时效组织和性能	42
2.6.1	Mg-Al 系合金	43
2.6.2	Mg-Zn 系合金	44
2.6.3	Mg-Mn 系合金	44
2.6.4	Mg-RE 系合金	44
2.6.5	其他合金	45
2.7	冶金缺陷对镁合金性能的影响	48
	参考文献	49

第3章 镁合金的加工性及选用设计

3.1	概述	51
3.2	镁合金铸造加工	52
3.2.1	常规压铸	52
3.2.2	真空压铸	58
3.2.3	充氧压铸	59
3.2.4	挤压铸造	60
3.2.5	半固态铸造	60
3.3	镁合金的塑性变形	62
3.3.1	镁合金挤压成形	65
3.3.2	镁合金锻造成形	68
3.3.3	镁合金等温成形	75
3.3.4	镁合金的超塑性	77
3.3.5	镁合金板材的成形	80
3.3.6	镁合金轧制技术	91
3.4	镁合金的连接	94
3.4.1	镁合金焊接特点与焊接性	95
3.4.2	镁及镁合金的焊接技术	98
3.4.3	镁合金的焊补	107
3.4.4	镁合金焊后热处理	108

3.4.5 镁合金的粘接	110
参考文献	112

第4章 镁合金在各行业中的选用及应用

4.1 镁合金的选用	114
4.2 镁合金在交通领域的应用	115
4.2.1 轨道交通	116
4.2.2 汽车行业	118
4.2.3 摩托车行业	125
4.2.4 自行车	129
4.2.5 轮椅	131
4.3 镁合金在航空航天领域的应用	132
4.3.1 航空航天对材料的要求与镁合金特点	132
4.3.2 航空常用镁合金牌号及性能	133
4.3.3 镁合金在航空领域应用实例	135
4.4 镁合金在武器装备中的应用	137
4.4.1 在武器中的应用	137
4.4.2 武器镁合金零件的应用前景	138
4.5 镁合金在3C产品中的应用	139
4.6 镁合金在能源领域的应用	141
4.6.1 电池应用	141
4.6.2 储氢材料应用	142
4.7 生物医用镁合金器件及开发	143
4.7.1 心血管支架	143
4.7.2 骨固定器件	145
4.7.3 骨组织工程多孔支架	146
4.8 镁合金在其他领域的应用	147
4.8.1 在LED领域的应用	148
4.8.2 镁合金牺牲阳极	148
4.8.3 镁合金在其他部件的应用	151
参考文献	151

第5章 镁合金的环境适应性及选用设计

5.1 镁的电化学特性及耐蚀性	155
5.1.1 镁的电化学特性	155

5.1.2	镁在室温下的腐蚀热力学和动力学	156
5.1.3	镁的负差数效应	157
5.1.4	氧化镁膜的结构及特点	158
5.1.5	镁在室温不同环境下的腐蚀	158
5.1.6	镁在高温下的氧化腐蚀	159
5.2	镁合金构件在使用环境中的耐蚀性	160
5.2.1	大气环境	160
5.2.2	海洋环境	162
5.2.3	土壤环境	164
5.2.4	太空环境	165
5.2.5	体液环境	165
5.3	镁合金构件的主要腐蚀形式及控制	168
5.3.1	全面腐蚀	168
5.3.2	电偶腐蚀	169
5.3.3	腐蚀疲劳	172
5.3.4	应力腐蚀开裂	173
5.3.5	丝状腐蚀	174
5.3.6	晶间腐蚀	175
5.3.7	点蚀和缝隙腐蚀	175
5.4	镁合金构件的防腐蚀选材与结构设计	176
5.4.1	选材	176
5.4.2	结构设计	182
5.5	提高镁合金耐蚀性的表面处理技术	183
5.5.1	表面预处理及清洗	183
5.5.2	化学转化膜	184
5.5.3	阳极氧化	189
5.5.4	微弧氧化	193
5.5.5	硅烷化处理	200
5.5.6	镀镍	203
5.5.7	含氟协合涂层	205
5.5.8	喷漆涂装	206
5.5.9	电泳涂装	208
5.5.10	热喷铝扩散处理	209
5.5.11	其他表面处理	213

5.6 其他提高镁合金耐蚀性能的途径	215
5.6.1 阴极保护抑制阳极过程	215
5.6.2 降低镁合金腐蚀的其他方法	215
参考文献	216

第6章 镁合金的耐磨性及选用设计

6.1 镁合金的摩擦磨损行为	218
6.1.1 镁合金的磨损失效形式	218
6.1.2 典型镁合金的摩擦磨损行为	219
6.2 提高镁合金耐磨性的表面强化技术	223
6.2.1 耐磨涂层材料的选用设计	223
6.2.2 镁合金表面强化改性	224
6.2.3 镁合金阳极氧化和微弧阳极氧化	226
参考文献	227

第7章 镁合金的再制造工程

7.1 镁合金构件再制造工程特点	230
7.2 电刷镀	231
7.2.1 电刷镀基本原理和特点	231
7.2.2 电刷镀材料的选择	231
7.2.3 电刷镀工序	232
7.2.4 电刷镀修复零件的典型工艺	232
7.3 热喷涂	233
7.3.1 热喷涂的原理和特点	233
7.3.2 镁合金热喷涂材料的选择	234
7.4 冷喷涂	234
7.4.1 冷喷涂的原理和特点	234
7.4.2 镁合金冷喷涂的研究进展	235
7.5 激光再制造技术	237
7.5.1 激光熔覆	237
7.5.2 激光表面合金化	238
7.5.3 激光修复实例	240
参考文献	241

第8章 镁合金的再生循环应用

8.1 概述	242
--------------	-----

8.2 工业化回收方式	243
8.2.1 炉前回收	244
8.2.2 厂内回收	244
8.2.3 厂外回收	244
8.2.4 卖给自由市场	244
8.3 压铸废镁合金的分类	244
8.4 镁合金废料的前期处理	245
8.5 废镁合金的再生方法	246
8.5.1 废镁合金熔剂熔炼法	247
8.5.2 废镁合金无熔剂熔炼法	247
8.6 废镁合金在熔炼中的质量控制	249
8.6.1 降低合金中铁的含量	250
8.6.2 降低合金中非金属杂质的含量	251
8.6.3 预防外来杂质	252
参考文献	253

第9章 生物医用镁合金

9.1 生物医用镁合金的特点	254
9.2 生物镁及镁合金材料	256
9.2.1 纯镁	257
9.2.2 生物医用镁合金	257
9.3 生物医用镁合金加工技术	263
9.3.1 生物医用镁合金的热塑性加工	263
9.3.2 生物医用镁合金的特种加工技术	265
9.3.3 亚快速凝固	270
9.3.4 超细晶镁合金的腐蚀机理	271
9.4 生物医用镁合金的失效形式及表面改性	272
9.4.1 钛氧膜涂层	273
9.4.2 钙磷盐涂层制备技术	274
9.4.3 复合涂层	275
9.4.4 功能梯度涂层	277
9.4.5 高分子生物活性涂层	278
9.5 生物医用镁合金及器件的发展趋势和应用前景	279
参考文献	281